

УДК 544.45, 537.075.8

К.В. КОРЫТЧЕНКО, канд. техн. наук, ст.н.сотр., начальник научной лаборатории "Современные методы вооружений" факультета военной подготовки НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРЯМОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ В ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В работе проведен анализ условий прямого инициирования детонации в области минимума критических энергий. Расчетные исследования проведены по модели одномерного инициирования в цилиндрической симметрии, построенной на основе системы уравнений одномерной газодинамики и химической кинетики применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси атмосферного давления. Обоснование требования к источнику инициирования с точки зрения практической досягаемости критических параметров инициирования.

Ключевые слова: прямое инициирование детонации, водородно-кислородная смесь.

Область исследования процессов инициирования детонации является актуальной как с точки зрения обеспечения взрывобезопасности, так и для решения прикладных задач по созданию энергоэффективных детонационных систем: пульсирующих детонационных двигателей, мощных детонационных лазеров, систем гуманитарного разминирования объемным взрывом и т.п. [1-3].

Васильевым А.А. предложена следующая классификация способов инициирования воспламенения горючей смеси: слабое, переход горения в детонацию, сильное [4]. В результате слабого воспламенения у источника инициирования формируется ламинарное или турбулентное пламя с характерными дозвуковыми скоростями его распространения по смеси. В случае сильного инициирования в непосредственной близости от инициатора возникает детонационная волна, которая распространяется по горючей смеси со сверхзвуковой скоростью. Сильное инициирование также принято называть прямым инициированием детонации. Инициирование перехода горения в детонацию обеспечивается первоначально зажиганием смеси от слабого инициатора и последующим ускорением пламени за счет автотурбулизации или взаимодействия с препятствиями и переходом к детонации. Такой переход возникает на существенном удалении от источника зажигания. В данной работе рассматривается задача прямого инициирования детонации.

© Корытченко К.В., 2012

В настоящее время установлено ряд параметров, влияющих на прямое инициирование детонации: критическая энергия, критическое время, критический объем [5]. Под критической энергией подразумевается минимальное количество энергии, которую необходимо затратить для инициирования детонации в заданных условиях. Иницирование детонации определяется временем ввода энергии в заданный объем. Поэтому критическая энергия представляет собой функцию зависимости от времени и объема. Влияние начальных термодинамических условий, состава детонирующей среды и параметров инициатора на критические параметры в данной работе не рассматриваются.

Целью данной работы является анализ условий прямого инициирования детонации в области минимума критических энергий с точки зрения практической достигаемости критических параметров инициирования. Расчетные исследования проведены по модели одномерного инициирования в цилиндрической симметрии, построенной на основе системы уравнений одномерной газодинамики и химической кинетики применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси атмосферного давления.

Анализ литературы. Взаимосвязь критических параметров прямого инициирования детонации.

Книстаутас Р. (Knystautas R.) и Лии Дж. (Lee J.), на основании обработки экспериментальных результатов по критическим параметрам прямого инициирования детонации искровых разрядом, установили зависимость критической энергии $Q_{кр}$ от времени ее ввода в ацетилено-кислородную смесь [5]. Согласно полученной зависимости (рис. 1), для каждой детонирующей смеси имеется параметр критического времени, в случае превышения которого критическая энергия начинает возрастать. В представленных результатах критическое время равняется около $\tau_{кр} \approx 0,1$ мкс. Также было установлено, что производная критических параметров (энергии и времени) в виде критической мощности $P_{кр}$ ввода энергии в детонирующую смесь имеет минимум в области критического времени, что видно по результатам (рис. 1, 2). Данный параметр имеет важное значение при анализе практической реализуемости.

Левиным В.А., Марковым В.В. и др. получена взаимосвязь между критическими параметрами инициирования на основе численного моделирования инициирования детонации в одномерной постановке газодинамической задачи в цилиндрической симметрии с учетом кинетики химических реакций применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси [6]. Ввод энергии в задачу осуществлялся по фиксированному радиусу.

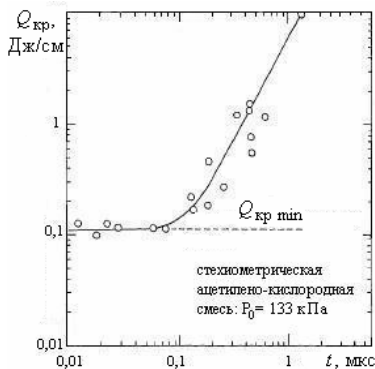


Рис. 1. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ инициирования от времени t её ввода по данным работы [5]

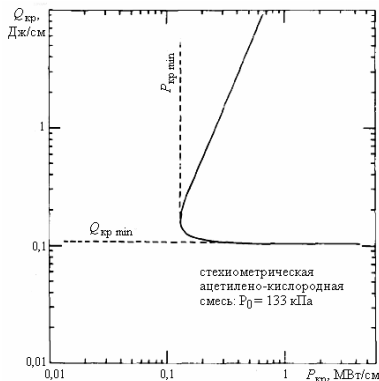


Рис. 2. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ от критической мощности $P_{кр}$ по данным работы [5]

Изменение удельной мгновенной мощности W (мощности, подводимой к единице объема) представлялось следующей зависимостью:

$$W(t) = \begin{cases} \frac{Q_0}{2\tau r_{ввод}^2} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_0 – величина энергии электрического разряда, отнесенная к единице длины и выделяемая в канале радиусом $r_{ввод}$ начиная с момента времени $t = 0$ в течение времени τ .

Решение задачи в такой постановке позволило подтвердить наличие критического времени ввода энергии в канал. В представленных результатах расчета критической энергии для стехиометрической водородно-кислородной смеси при начальных значениях температуры $T_0 = 298$ К и давления $P_0 \approx 50$ кПа показано (рис. 3), что если длительность разряда не превышает некоторой величины, которая в приведенном примере составляет $\tau_{кр} = 0,002$ мс, то критическая энергия составляет $Q_{кр} = Q_0 = 320$ Дж/м.

Установлено [6], что в случае превышения критического времени $\tau_{кр}$ критическая энергия $E_{кр}$ инициирования детонации начинает зависеть от времени ввода энергии в канал по зависимости:

$$Q_{кр} \sim (\tau_{кр})^\alpha, \quad (2)$$

где $\alpha \approx 2$ [7].

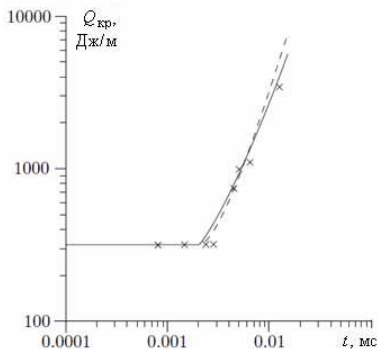


Рис. 3. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ от времени ввода энергии при инициировании детонации в водородно-кислородной смеси при $P_0 \approx 50$ кПа и $r_{ввод} = 0,001$ м: расчет (сплошная линия); аналитическая зависимость (штриховая линия); экспериментальные данные (x) [6]

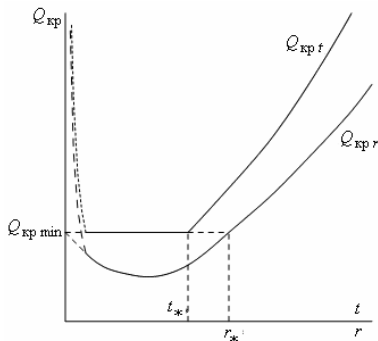


Рис. 4. Характерная зависимость критической энергии от времени ее ввода в объем и размера данного объема по Васильеву А.А. [4]

Следует отметить, что авторы указывают о влиянии объема, в который осуществляется ввод энергии, на критическую энергию. При этом отмечается, что существует оптимальные размеры данного объема, при котором критическая энергия достигает минимального значения [6]. Оценку данного влияния авторы не приводят.

Результаты исследования влияния объема, в который вводится энергия, на критическую энергию представлены Васильевым А.А. (рис. 4). Согласно полученных им результатов, за счет изменения объема возможна минимизация критической энергии. То есть, существует критический объем, при котором критическая энергия достигает минимального значения. При этом, время ввода критической энергии не должно превышать критического времени. На основании выполнения условий по не превышению критического объема и критического времени, автор дает рекомендацию, согласно которой идеальный инициатор детонации должен соответствовать критериям "мгновенности" и "точности".

Представленные Васильевым А.А. результаты о влиянии объема на критическую энергию являются не полными, так как рассматривают процесс прямого инициирования детонации только под воздействием ударной волны, формируемой в результате быстрого выделения энергии в заданном объеме.

Известным альтернативным методом прямого инициирования детонации является инициирование объемным воспламенением, теоретически обоснованным Я.Б. Зельдовичем, Либровичем В.Б. и др. Данными авторами обоснован механизм возникновения детонации в двигателях внутреннего сгорания, основанный на взрывообразном объемном протекании химических реакций. По этому механизму инициирование детонации обеспечивается ударной волной, формируемой в результате "одновременного" воспламенения горючей смеси в большом объеме. В работе [8] при постановке задачи в начальный момент времени в реакционно-способном газе задается распределение температуры (рис. 5) в полупространстве $X > 0$ в виде линейной функции:

$$T(0, X) = T_0 - \chi X. \quad (3)$$

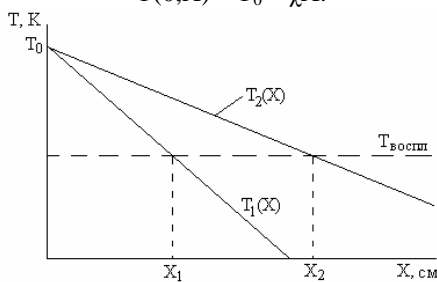


Рис. 5. Начальное распределение температуры при моделировании инициирования детонации по механизму Зельдовича Я.Б. и др. [8]

Согласно представленным расчетно-теоретическим исследованиям, условия для инициирования детонации по данному механизму возникают, если в неравномерно разогретой горючей смеси появляется градиент температуры χ , превышающий некое критическое значение. Так как температура T_0 в указанной работе имела фиксированное значение $T_0 = 2000$ К, то соответственно, изменение градиента χ приводило к изменению размеров области нагретого газа, в котором в начальный момент времени созданы условия для протекания процесса сгорания. Это дает основание предположить, что критическим условием возникновения детонации является не градиент температуры, а критический размер области объемного воспламенения, то есть критический объем.

Вышеизложенное дает основание считать, что критическая энергия представляет собой функцию зависимости от времени и объема.

Математическая модель прямого инициирования детонации при фиксированных параметрах ввода энергии в моделируемый канал. Проведем количественную оценку зависимости критической

энергии от времени её ввода и размера области ввода данной энергии применительно к стехиометрической водородно-кислородной смеси, находящейся в стандартных начальных условиях ($P_0 = 10^5$ Па; $T_0 = 293,15$ К). В качестве источника инициирования детонации предусматривается применение искрового разряда. Так как газодинамическое расширение искрового канала имеет цилиндрическую симметрию, то задача инициирования рассматривалась в цилиндрической постановке.

В одномерной постановке в диапазоне $0 < r < l$ решалась система газодинамических уравнений (неразрывности, импульса и энергии) для многокомпонентной газовой смеси в виде:

$$\frac{\partial \vec{a}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \vec{b})}{\partial r} = \frac{1}{r} \vec{f}, \quad (4)$$

где вектор-столбцы равны:

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v \\ \rho \epsilon + \rho v^2 / 2 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} \rho v \\ P + \rho v^2 \\ u(\rho \epsilon + \rho v^2 / 2 + P) \end{pmatrix}, \quad \vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ P \\ r \cdot W \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где ρ – плотность газа; v – скорость; P – давление; ϵ – внутренняя энергии газа; r – координата по радиусу, W – удельная мощность, вводимая от источника энергии.

Давление в смеси определялось по сумме парциальных давлений компонентов смеси в виде:

$$P = R_* T \sum_i y_i, \quad (6)$$

где R_* – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; y_i – концентрация i -й компоненты.

Энергия единицы объема смеси рассчитывалась по выражению:

$$\rho \epsilon = \sum_i y_i U_i^0, \quad (7)$$

где U_i^0 – внутренняя энергия 1 моля компоненты смеси, рассчитываемая по выражению:

$$U_i^0 = H_i^0 - RT, \quad (8)$$

где H_i^0 – энтальпия образования 1 моля компоненты.

Плотность смеси рассчитывалась по выражению:

$$\rho = \sum_i y_i \cdot \mu_i, \quad (9)$$

где μ_i – молярная масса i -й компоненты.

Процесс инициирования детонации рассматривался примени-

тельно к стехиометрической водородно-кислородной смеси, находящейся в стандартных начальных условиях. Химическая кинетика сгорания водорода моделировалась по упрощенной кинетической схеме, заимствованной из работы [9], включала в себя 8 компонент (H , O , OH , H_2O_2 , O_2 , H_2 , HO_2 , H_2O) и описывалась системой из 17 элементарных обратимых химических реакций.

В начальных условиях принято отсутствие газодинамических возмущений во всей расчетной области. На оси разрядного канала принято отсутствие градиентов термодинамических параметров газа. Размер расчетной области задавался таким образом, чтобы возмущение не достигало границы.

Ввод энергии осуществлялся по фиксированному радиусу в течение задаваемого времени при постоянной удельной мощности $W = \text{const}$. Такая постановка задачи не отражает ввод энергии в искровом разряде, изменяющийся как во времени, так и в пространстве, но позволяет выработать требования к инициатору.

Расчет проводился с использованием модифицированной схемы Годунова С.К. второго порядка точности. Стойкость расчетной схемы достигнута за счет выполнения условия Куранта. Решение уравнений химической кинетики сводилось к решению жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Правильность математической модели подтверждена совпадением параметров детонационной волны, получаемых при расчете, с параметрами детонационной волны Чепмена-Жуге.

Результаты моделирования прямого иницирования детонации при фиксированных параметрах ввода энергии в моделируемый канал. Проведем анализ иницирования в условиях, когда в процессе ввода энергии падение плотности газа в канале, по которому осуществлялся ввод, осуществляется незначительно. В этом случае источник иницирования соответствует критерию "мгновенности". То есть, изменение термодинамического состояния газа в канале практически соответствует нагреванию в постоянном объеме. Расчеты показали, что при радиусе ввода энергии, равном $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м, расширение канала происходит незначительно за время, не превышающее $t \leq 10^{-8}$ с. Поэтому данное сравнение проведено при времени ввода энергии, равном $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с. Путем расчета динамики расширения канала при изменении количества энергии в каждом расчете, вводимой за время $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с, по параметрам распределения термодинамического состояния газа в расчетной области определялось минимальное количество энергии, при которой возникала детонация. Удельная мощность источника энергии, вводимой в канал, имела фиксированное значение

на период ввода энергии. Заключение о наличии инициирования детонации принималось в случае, если термодинамическое состояние газа во фронте волны после прекращения ввода энергии приближалось к параметрам, соответствующим расчетному термодинамическому состоянию детонационной волны Чепмена-Жуге, и поддерживалось с отклонением не более чем на 10 % в течение последующих нескольких микросекунд (рис. 6). Так, согласно [10], параметры на фронте детонационной волны, возникающей в стехиометрической водородно-кислородной смеси при начальной плотности $\rho_0 = 0,491 \text{ кг/м}^3$ имеют значения: $P_\phi = 1,879 \text{ МПа}$; $T_\phi = 3682 \text{ К}$. При этом, скорость детонационной волны составляет $D = 2873 \text{ м/с}$. В представленных ниже результатах начальная плотность равнялась $\rho_0 = 0,536 \text{ кг/м}^3$, что приводит к более повышенным значениям термодинамического состояния газа на фронте волны.

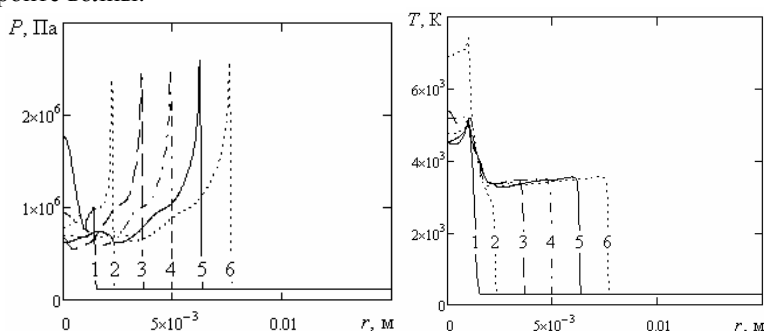


Рис. 6. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при инициировании детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси при $r_{\text{ввод}} = 0,001 \text{ м}$ и $t_{\text{ввод}} = 10^{-6} \text{ с}$ и $W = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ Вт/м}^3$: $t_1 = 0,5 \text{ мкс}$, $t_2 = 1 \text{ мкс}$, $t_3 = 1,5 \text{ мкс}$, $t_4 = 2 \text{ мкс}$, $t_5 = 2,5 \text{ мкс}$, $t_6 = 3 \text{ мкс}$

Расчеты приведены для фиксированных радиусов $r_{\text{ввод}}$ ввода энергии, значения которых равнялись $0,0001 \text{ м}$; $0,0002 \text{ м}$; $0,0005 \text{ м}$; $0,001 \text{ м}$; $0,002 \text{ м}$; $0,003 \text{ м}$; $0,005 \text{ м}$. Получено, что с ростом радиуса $r_{\text{ввод}}$ при $t_{\text{ввод}} = 10^{-8} \text{ с}$ происходит возрастание критической энергии инициирования детонации (рис. 7). В области радиуса $r_{\text{ввод}} = 0,003 \text{ м}$ наблюдается снижение энергии инициирования.

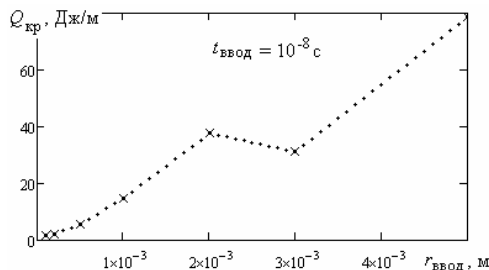


Рис. 7. Зависимость критической энергии $Q_{кр}$ инициирования детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси от радиуса ввода энергии $r_{ввод}$ при $t_{ввод} = 10^{-8}$ с

Полагается, что снижение энергии вблизи $r_{ввод} = 0,003$ м связано с изменением механизма инициирования детонации. Так, при меньших радиусах ввода энергии инициирование детонации обеспечивается ударной волной, движущейся по горючей смеси, параметры которой соответствуют начальным условиям (рис. 8). При этом, в расчетном варианте инициирование происходит за период времени, не превышающий 1,5 мкс.

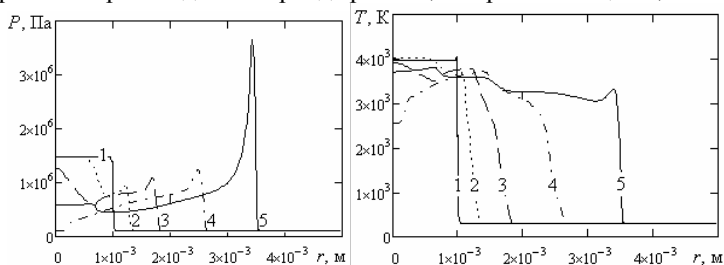


Рис. 8. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при $r_{ввод} = 0,001$ м и $t_{ввод} = 10^{-8}$ с и $W = 4,5 \cdot 10^{14}$ Вт/м³: $t_1 = 10^{-8}$ с, $t_2 = 0,2$ мкс, $t_3 = 0,5$ мкс, $t_4 = 1$ мкс, $t_5 = 1,5$ мкс

При возрастании радиуса ввода энергии с превышением некоей величины, соответствующей в рассматриваемой задаче $r_{ввод} \approx 0,003$ м, инициирование детонации происходит с задержкой. В расчетном варианте (рис. 9) при $r_{ввод} = 0,005$ м первоначально на протяжении около 2 мкс происходят предпламенные реакции (кривые 1-5), в которых происходит наработка химически активных радикалов (период индукции) в условиях пренебрежимо малого изменения термодинамического состояния смеси. На последующем интервале 2,5...3,5 мкс (кривые 6, 7) наступает стадия цепных реакций вблизи центра канала с нарастанием

температуры, давления и формированием волны сжатия. При этом, данная волна распространяется с ускорением по уже "подготовленной" смеси с обострением фронта волны (кривые 8, 9) и дальнейшим переходом в детонационную волну (кривая 9).

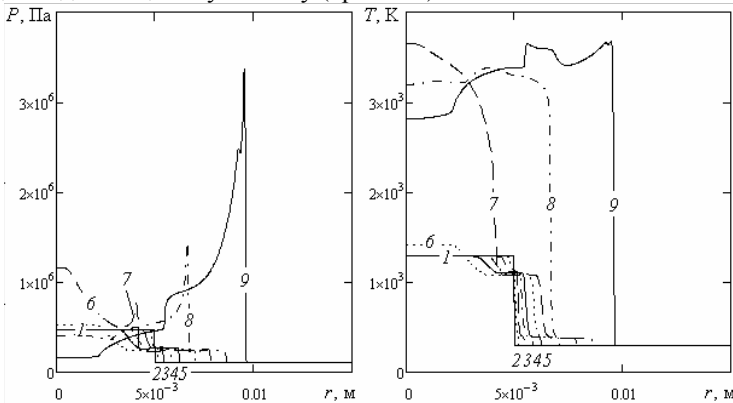


Рис. 9. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при $r_{\text{ввод}} = 0,005$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с и $W = 10^{14}$ Вт/м³: $t_1 = 10^{-8}$ с, $t_2 = 0,2$ мкс, $t_3 = 0,5$ мкс, $t_4 = 1$ мкс, $t_5 = 1,5$ мкс, $t_6 = 2,5$ мкс, $t_7 = 3,5$ мкс, $t_8 = 4,5$ мкс, $t_9 = 5,5$ мкс

С возрастанием радиуса $r_{\text{ввод}}$ при фиксированном времени $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с происходит уменьшение минимальной (критической) удельной мощности $W_{\text{кр}}$ ввода энергии, при которой происходит инициирование детонации (рис. 10). Но после превышения радиуса, при котором обеспечивается инициирование объемным воспламенением, критическая мощность принимает фиксированное значение. В расчетных условиях задачи при $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с критическая мощность составила $W_{\text{кр}} = 10^{14}$ Вт/м³.

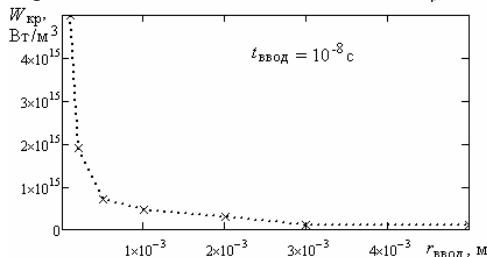


Рис. 10. Зависимость критической мощности $W_{\text{кр}}$ для инициирования детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси в стандартных начальных условиях от радиуса ввода энергии $r_{\text{ввод}}$ при $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с

Выход на фиксированное значение критической удельной мощности с ростом радиуса ввода энергии при фиксированном времени ввода связано с необходимостью нагревания горючей смеси до температуры, при которой обеспечивается протекание предпламенных химических реакций. В расчетных вариантах данная температура составила около $T \approx 1350$ К.

С возрастанием радиуса $r_{\text{ввод}}$ при фиксированном времени ввода $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с также уменьшаются требования к верхним порогам давления и температуры, которые необходимо достичь за время $t_{\text{ввод}}$ для обеспечения инициирования детонации. В расчетных вариантах, при радиусе $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с требуется достичь давление $P_{\text{макс1}} \approx 20$ МПа и температуру $T_{\text{нагр1}} \approx 30000$ К (рис. 11). Для сравнения, уже при радиусе $r_{\text{ввод}} = 0,001$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с требуемые параметры снижаются до $P_{\text{макс2}} \approx 1,5$ МПа и $T_{\text{нагр2}} \approx 4000$ К (рис. 8).

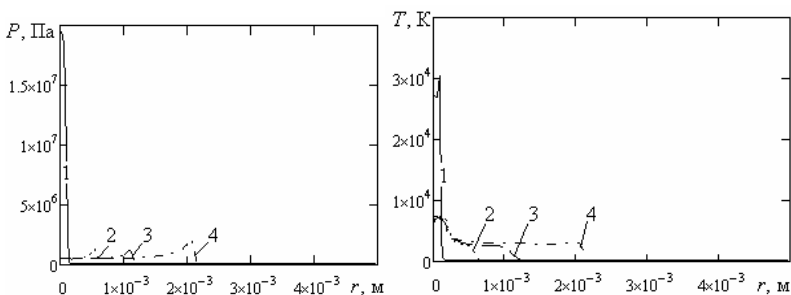


Рис. 11. Распределение давления (слева) и температуры (справа) вдоль радиуса r расчетной области на разные моменты времени при $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м и $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с и $W = 5 \cdot 10^{15}$ Вт/м³: $t_1 = 10^{-8}$ с, $t_2 = 0,2$ мкс, $t_3 = 0,5$ мкс, $t_4 = 1$ мкс

Следует учитывать, что в модели не учитываются затраты энергии на ионизацию. Поэтому фактические затраты энергии искрового разряда будут выше расчетных, особенно при температуре $T > 10000$ К.

Расчетная зависимость пороговых значений температуры, создаваемой за время $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с, при которой обеспечивается инициирование детонации в стехиометрической водородно-кислородной смеси в указанных начальных условиях в зависимости от радиуса ввода энергии имеет вид (рис. 12).

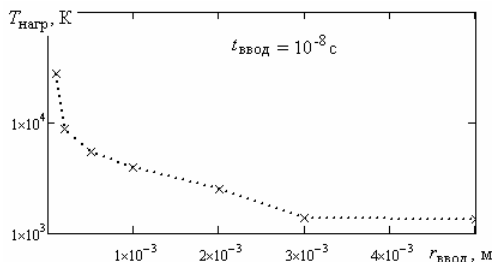


Рис. 12. Зависимость пороговых значений температуры, создаваемой за время $t_{\text{ввод}} = 10^{-8}$ с, при которой обеспечивается инициирование детонации, от радиуса ввода энергии

Следует отметить, что температура самовоспламенения смеси водорода с кислородом равняется около $T_{\text{св}} \approx 750$ К. Необходимость в нагревании смеси до температуры $T \approx 1350$ К для достижения инициирования за счет объемного воспламенения может быть связана с отличием в периоде индукции. Так, по данным работы Р.И. Солоухина [11], резкое сокращение периода индукции в данной смеси наблюдается в условиях превышения температуры более $T > 1000$ К (рис. 13).

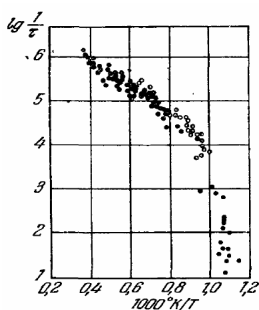


Рис. 13. Зависимость периода индукции в водородно-кислородной смеси от температуры по данным Р.И. Солоухина [11]

Расчеты зависимости критической энергии от времени ввода при разных радиусах $r_{\text{ввод}}$ ввода энергии $0,0001$ м; $0,001$ м подтвердили ранее полученные другими авторами результаты о наличии критического времени. В расчетных вариантах данное время при $r_{\text{ввод}} < 0,001$ м составило около $\tau_{\text{кр}} = 10^{-7} \dots 5 \cdot 10^{-7}$ с (рис. 14, 15).

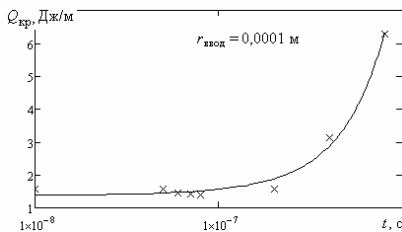


Рис. 14. Зависимость критической энергии от времени ввода при радиусе ввода энергии $r_{\text{ввод}} = 0,0001$ м

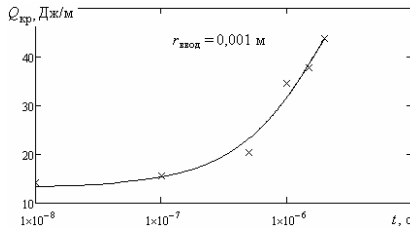


Рис. 15. Зависимость критической энергии от времени ввода при радиусе ввода энергии $r_{\text{ввод}} = 0,001$ м

Но с увеличением радиуса ввода энергии при возрастании времени ввода энергии критическая энергия увеличивается более медленно.

Выводы. Полученные результаты могут быть полезны для оценки взрывобезопасности, а также для решения задачи энергоэффективного периодического инициирования детонации в пульсирующих детонационных двигателях, мощных детонационных лазерах, системах гуманитарного разминирования объемным взрывом и т.п.

На основании анализа условий прямого инициирования детонации в области минимума критических энергий получено, что в случае увеличения радиуса, по которому осуществляется ввод энергии, снижается удельная мощность источника энергии, уменьшаются пороговые значения температуры, которую необходимо достичь за счет ввода энергии, увеличивается время, в течение которого требуется ввести критическую энергию. Поэтому, считается целесообразным создавать источники инициирования, в которых обеспечивается объемный ввод энергии.

Список литературы: 1. Баженова Т.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме / Т.В. Баженова, В.В. Голуб // Физика горения и взрыва. – 2003. – 39, (4). – С. 3-21. 2. Митрофанов В.В. Тяговые характеристики идеального пульсирующего детонационного двигателя / В.В. Митрофанов, С.А. Ждан // Физика горения и взрыва. – 2004. – т. 40. № 4. – С. 8-14. 3. Тарасов А.И. Использование пульсирующих детонационных технологий для повышения тяговой эффективности двигателей / А.И. Тарасов, В.А. Цинаков // Общие вопросы двигателестроения. – 2010. – С. – 69-72. 4. Васильев А.А. Энергетические аспекты инициирования бытовых газов / А.А. Васильев // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 45, №1. – С. 96-101. 5. Knystautas R. On the effective energy for direct initiation of gaseous detonations / R. Knystautas, J.H. Lee // Combustion and flame. – 1976. – № 27. – Р. 221-228. 6. Левин В.А. Нелинейные волновые процессы при инициировании распространении газовой детонации / В.А. Левин, В.В. Марков, Т.А. Журавская, С.Ф. Осинкин // Труды математиче-

ского института им. В.А. Стеклова. – 2005. – Т. 251. – С. 200-214. **7.** Lee J.H. Initiation of gaseous detonation / *J.H. Lee* // *Ann. Rev. Phys. Chem.* – 1977. – V. 28. – P. 75-104. **8.** Зельдович Я.Б. О возникновении детонации в неравномерно нагретом газе / Я.Б. Зельдович, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе, Г.И. Сивахинский // *Журнал прикладной механики и технической физики.* – 1970. – №2. – С.76-84. **9.** Murray S. Explosion Physics - Fundamentals and Current Developments // Professor I.I. Glass 6th Memorial Lecture. – 2001. **10.** Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем / В.В. Митрофанов – Новосибир.: изд. ИГиЛ СО РАН. – 2003. – 200 с. **11.** Солоухин Р.И. Детонационные волны в газах / Р.И. Солоухин // *Успехи физических наук.* – 1963. – Т. LXXX. – вып. 4. – С. 525-551.

Поступила в редколлегию 09.10.2012

УДК 544.45, 537.075.8

Анализ условий прямого инициирования детонации в водородно-кислородной смеси атмосферного давления / Корытченко К.В. // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 85-98. Бібліогр.: 11 назв.

В роботі проведено аналіз умов прямого ініціювання детонації в області мінімуму критичних енергій. Розрахункові дослідження проведені за моделлю одновимірного ініціювання в циліндричній симетрії, побудованої на основі системи рівнянь одномірної газодинаміки та хімічної кінетики стосовно до стехіометричної воднево-кисневої суміші атмосферного тиску. Обґрунтування вимог до джерела ініціювання з точки зору практичної досяжності критичних параметрів ініціювання.

Ключові слова: пряме ініціювання детонації, воднево-киснева суміш.

In the paper analysis of conditions of direct initiation of detonation in the region of the minimum of critical energy is carried out. Calculations are carried out by a model of one-dimensional initiation in cylindrical symmetry, built on the base of a system of equations of one-dimensional gas dynamics and chemical kinetics with respect to the stoichiometric hydrogen-oxygen mixture at atmospheric pressure. Substantiation of requirements for initiation source from a point of view of practical reach of the critical parameters of initiation.

Keywords: direct initiation of detonation, hydrogen-oxygen mixture.